

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑩ DE 43 17 623 A 1

⑤1 Int. Cl.⁵:
C 23 F 4/00
H 01 L 21/306

②1 Aktenzeichen: P 43 17 623.2
②2 Anmeldetag: 27. 5. 93
④3 Offenlegungstag: 1. 12. 94

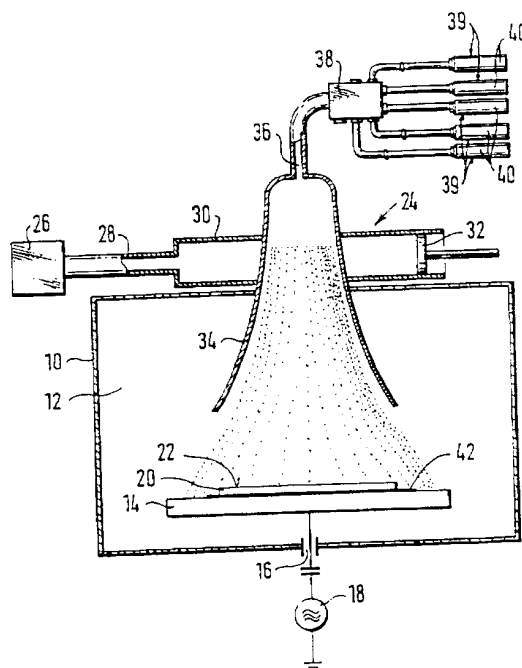
DE 43 17 623 A 1

⑦1 Anmelder:
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

⑦2 Erfinder:
Laermer, Franz, Dr., 7000 Stuttgart, DE; Schilp,
Andrea, 7070 Schwäbisch Gmünd, DE

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zum anisotropen Plasmaätzen von Substraten

⑤7 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum anisotropen Plasmaätzen von Substraten (20), insbesondere von Siliciumsubstraten, bei dem ein Abtragen der Substratoberfläche (22) mittels zum Substrat (20) hin beschleunigten Ionen erfolgt sowie eine Vorrichtung zum Durchführen des Verfahrens und nach dem Verfahren hergestellte Bauteile. Es wird vorgeschlagen, daß in den Prozeßraum (12) ein ein Halogen oder eine Halogenverbindung enthaltendes Ätzgas (40) und ein Passiviergas (40), das polymerbildende Monomere enthält, eingeleitet und durch intensive Energieeinstrahlung angeregt wird, und daß an das Substrat (20) oder an eine das Substrat (20) aufnehmende Elektrode (16) eine solche Spannung angelegt wird, daß die Ionen beim Auftreffen auf das Substrat (20) eine Energie zwischen 1 und 40 eV, vorzugsweise zwischen 10 und 30 eV, aufweisen. Dadurch lassen sich elektronische Bauteile und Sensorstrukturen ätzen, die schmale Gräben mit hohen Aspektverhältnis beziehungsweise sehr tiefe Gräben aufweisen.



DE 43 17 623 A 1

EL302702614

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum anisotropen Plasmaätzen von Substraten und eine Vorrichtung zum Durchführen des Verfahrens sowie Bauteile, die nach dem Verfahren hergestellt sind.

Anisotrope Plasmaätzverfahren, insbesondere für Silicium, zeichnen sich dadurch aus, daß die herzustellenden Strukturen praktisch unabhängig von der Kristallorientierung in das Substrat eingearbeitet werden können. Bevorzugte Anwendungsgebiete sind die Mikromechanik und Sensorik, wo Strukturen mit hohem Aspektverhältnis (Strukturbreite zu -tiefe) beziehungsweise mit schmalen Gräben und senkrechten Wänden herzustellen sind, beispielsweise schwingende Strukturen, kapazitive oder resonante Sensoren, elektrostatische Aktuatoren usw., ferner die Mikroelektronik, wo sogenannte Trenchgräben zur Bauelementeisolierung oder Kollektorkontaktierung erforderlich sind oder allgemein Speicherzellen. Durch die Erzeugung schmaler Gräben werden erhebliche Einsparungen an Chipfläche möglich.

Die zum anisotropen Siliciumplasmaätzen üblicherweise eingesetzten RIE-Prozesse (RIE = reactive ion etching) basieren auf den schwächer reaktiven Halogenen Chlor oder Brom, die entweder direkt eingesetzt oder aus entsprechenden Verbindungen (zum Beispiel CF_3Br , CCl_4 , CF_2Cl_2 , CF_3Cl) im Plasma freigesetzt werden, sowie auf Ionen mit relativ hoher Energie (zum Beispiel 100 eV und mehr). Das daraus resultierende Ionenbombardement auf dem Ätzgrund initiiert dort die Umsetzung adsorbierter Halogenradikale mit dem abzutragenden Silicium, während die Spontanreaktion an den Seitenwänden der geätzten Strukturen, die keiner direkten Ioneneinwirkung ausgesetzt sind, bei diesen schwächer reaktiven Halogenen gering ist.

Mit Chlor- oder Bromprozessen sind allerdings eine Fülle von Problemen sowohl anlagentechnischer als auch prozeßtechnischer Art verbunden, da die Gase teilweise extrem korrosiv oder gar giftig und krebserzeugend sind. Ferner bilden sie auf dem Ätzgrund sogenanntes unerwünschtes "black silicon" und besitzen eine geringe Maskenselektivität, das heißt Maskenmaterial und Substrat weisen vergleichbare Ätzraten auf. Außerdem sind diese FCKW- oder FBrKW-Stoffe in naher Zukunft nicht mehr verfügbar.

Prozesse auf Fluorchemiebasis, die diese Nachteile teilweise beheben, liefern erheblich größere Siliciümätzraten und sind prozeß- und anlagentechnisch wesentlich unkritischer, weisen aber einen inhärenten isotropen Ätzcharakter auf, das bedeutet, daß die spontane Ätzreaktion von Fluorradikalen gegenüber Silicium so groß ist, daß auch die Seitenwände geätzter Strukturen erheblich angegriffen werden und eine starke Unterätzung stattfindet. Versuche in einem RIE-Plasma neben den die Ätzung bewirkenden Ionen auch polymerbildende Monomere gleichzeitig kontrolliert zu erzeugen und im Plasma ausreichend lange zu erhalten, um damit die Seitenwände der Ätzstrukturen durch Polymerbedeckung vor einem Ätzangriff zu schützen, während der Ätzgrund ionenunterstützt von den Ätzspezies angegriffen wird, scheitern an der schwer beherrschbaren Plasmachemie. Die Koexistenz von Fluorradikalen und ungesättigten Monomeren ist bei niedrigen Anregungsdichten nahezu unmöglich zu erreichen. Ferner sind die

damit erzielbaren Ätzraten sehr niedrig und das Problem des zu hohen Maskenabtrags relativ zur Siliciümätzrate ist ebenfalls ungelöst.

Das erfindungsgemäße Verfahren beruht auf der Erzeugung eines Plasmas geeigneter chemischer Zusammensetzung, bevorzugt auf reiner Fluorchemiebasis, mit hoher Dichte an reaktiven Teilchen und niederenergetischen Ionen durch intensive Energieeinstrahlung. Der Verzicht auf Chlor oder Brom bedeutet erhebliche Kosteneinsparungen an Sicherheitseinrichtungen, Abgasreinigung sowie verminderten Anlagenverschleiß.

Die nur geringe Beschleunigung der generierten Ionen zum Substrat hin ergibt eine hohe Maskenselektivität, das heißt die Maskensubstanz (SiO_2 und sogar Photolack) wird fast gar nicht mehr abgetragen. Es werden hohe Ätzraten in Si von einigen Mikrometern/Minute und eine nahezu perfekte Anisotropie der Ätzung ohne Unterschneiden der Maske erreicht.

Dies wird dadurch möglich, das gleichzeitig ein Ätzgas, insbesondere ein fluorlieferndes Ätzgas, wie SF_6 , CF_4 oder NF_3 , und ein Passiviergas, das polymerbildende Monomere liefert, wie CHF_3 , C_2F_6 oder C_2F_4 eingesetzt wird. Durch intensive Plasmaanregung, insbesondere durch Mikrowelleneinstrahlung, wird dadurch gleichzeitig eine große Zahl von freien Fluorradikalen und teflonbildenden Monomeren im Plasma generiert. Die hohe Intensität der Anregung erlaubt eine Koexistenz dieser an sich völlig gegensätzlichen Verbindungen im Plasma über eine ausreichend lange Zeitspanne, um so einen Seitenwandschutz aufbauen zu können.

Durch die ausschließliche Einwirkung von Ionen mit sehr geringer Energie auf den Ätzgrund wird dieser von einer Polymerbedeckung durch die CF_2 -Monomere freigehalten und kann von den Fluorradikalen ungehindert geätzt werden, während die Seitenwände mit einem teflonartigen Film $(\text{CF}_2)_n$ bedeckt und dadurch vor der Ätzung geschützt werden. Um den Ätzgrund freizuhalten, genügen Ionenenergien zwischen 1 und 40 eV, vorzugsweise zwischen 10 und 30 eV, wodurch der Abtrag des Maskenmaterials, zum Beispiel SiO_2 oder Photolack, sehr gering gehalten werden kann.

Da das Maskenmaterial Photoresist sein kann, sind erhebliche Kostenvorteile in der Fertigung gegeben. Der Einsatz von Photolackmasken ist wesentlich billiger als die sonst notwendigen Hartstoffmasken und gestattet eine höhere Prozeßflexibilität. Viele Strukturen sind überhaupt nur unter diesen flexiblen Randbedingungen realisierbar.

Wesentlich für den Seitenwandschutz durch ein Seitenwandpolymer und für eine hohe Maskenselektivität ist eine gute thermische Ankopplung des zu ätzenden Substrats an die Substratelektrode, um ein Überhitzen der dem Plasma zugewandten Substratoberfläche zu vermeiden. Steigen die Substrattemperaturen auf Werte $> 100^\circ\text{C}$, nimmt der Abtrag von Photolackmasken allmählich zu und die chemische Stabilität der Seitenwandpolymere langsam ab. Die thermische Kopplung zwischen Substrat und Substratelektrode kann beispielsweise erreicht werden durch einen Heliumkonvektionsstrom zwischen der Substratrückseite und der Elektrodenoberfläche oder durch ein dazwischen angeordnetes Elastomer. Der Abstand zwischen dem Substrat und der Elektrode liegt üblicherweise in einem Bereich um 0,1 mm.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann vorteilhaft in

allen Plasmaanlagen durchgeführt werden, die mindestens eine Elektrode, einen Gaseinlaß und Mittel zum Einstrahlen von Energie aufweisen. Die Energie kann in Form hochfrequenter Wechselspannung in einer Triodenanordnung, einem induktiv gekoppelten Plasma (ICP) oder besonders vorteilhaft durch Einstrahlung von Mikrowellen in eine ECR- oder PIE-Anordnung dem Plasma zugeführt werden (ECR = Elektron-Zyklotron-Resonanz, PIE = Propagation Ion Etching). Dabei können Bauteile hergestellt werden, die geätzte Strukturen mit einem hohen Aspektverhältnis beziehungsweise extrem tiefe Gräben aufweisen.

Zeichnung

In der einzigen Figur ist eine Plasmaanlage mit Mikrowellenanregung dargestellt und in der nachfolgenden Beschreibung unter Angabe weiterer Vorteile erläutert.

Beschreibung

Eine typische Anlage besitzt einen Rezipient 10 mit einem evakuierbaren Prozeßraum 12. In diesem ist eine flächenhafte Elektrode 14 angeordnet, die durch eine Vakuumdurchführung 16 mit einem Hochfrequenzgenerator 18 verbunden ist. Auf der Elektrode 14 liegt ein Substrat 20, dessen Oberfläche 22 zu bearbeiten ist.

Über dem Substrat 20 befindet sich eine Anordnung 24, die einen Mikrowellengenerator 26 aufweist, der über einen Hohlleiter 28 mit einem Resonator 30 verbunden ist. Vom Resonator 30, der einen Anpassungsschieber 32 aufweist, können Mikrowellen in einen kalottenförmigen, auf das Substrat zielenden Strahler, ein sogenanntes Surfatron 34, eingekoppelt und von dort auf die Substratoberfläche 22 geleitet werden. Mittels einer nicht dargestellten Zündvorrichtung kann über der Substratoberfläche 22 und im Surfatron 34 ein Plasma gezündet werden.

Das Surfatron 34 weist einen Gaseinlaß 36 auf, der mit einer Mischbatterie 38 verbunden ist, an der unterschiedliche Gase 40 enthaltende Gasvolumengefäße 39 angeschlossen sind, wodurch die Gase 40 mit unterschiedlichen Volumenströmen mischbar und dem Prozeßraum 12 zuleitbar sind.

Um zu hohe Substrattemperaturen zu vermeiden, kann zwischen dem Substrat 20 und der Elektrode 14 ein Elastomer 42 angeordnet sein, das die Wärmeabfuhr vom Substrat 20 auf die Elektrode 14 verbessert. Alternativ kann die Elektrode 14 Halter aufweisen (nicht dargestellt), die das Substrat 20 in einem definierten Abstand von beispielsweise 0,1 mm über der Elektrode gegen eine Dichtvorrichtung drücken. Durch den entstehenden Spalt wird dann beispielsweise durch Bohrungen in der Elektrode 14 ein Heliumkonvektionsstrom zur Kühlung geführt. Die Dichtvorrichtung dichtet das Vakuum gegenüber dem Heliumstrom ab.

Das erfindungsgemäße Verfahren eignet sich prinzipiell für alle Plasmaanlagen, bei denen mittels einer intensiven Hochfrequenz- oder Mikrowellenanregung ein hochdichtes Plasma (ca. 10^{12} Ionen/cm³) erzeugbar ist. Die durch die Hochfrequenz- oder Mikrowellenanregung erzeugten Ionen geringer Energie werden durch die zusätzlich in die Substratelektrode eingekoppelte Hochfrequenzleistung aus dem Plasma auf die gewünschte Energie zum Substrat hin beschleunigt. Auf diese Weise kann die Ionenenergie unabhängig von der Plasmadichte eingestellt werden. Dabei sind auch an-

re Plasmaerzeugungsprozesse denkbar, beispielsweise mittels einer Triodenanordnung mit Magnetronanregung oder Plasmen mit ECR- oder ICP-Anregung.

Geeignete Prozeßparameter, mit der die beschriebene Anlage betreibbar ist, liegen vor bei einem Prozeßdruck zwischen 1 und 100 µbar, einem SF₆-Fluß zwischen 10 und 200 sccm (standard ccm/min) und einem CHF₃-Fluß zwischen 50 und 300 sccm. Zur Verbesserung der Prozeßstabilität kann noch ein Argonfluß zwischen 10 und 100 sccm zugegeben werden. Die Ätzgrund- und Seitenwandrauigkeiten werden durch geringe Beimischungen von N₂, vorzugsweise zwischen 10 und 100 sccm und/oder von O₂, vorzugsweise zwischen 1 und 10 sccm günstig beeinflusst, wobei die Gase vorteilhaft von Anfang an zugemischt werden. Im Fall einer Mikrowellenanregung sollte die eingekoppelte Mikrowellenleistung zwischen 300 und 1200 Watt betragen. Mit einer Hochfrequenzleistung zwischen 1 und 20 Watt an der Substratelektrode können, je nach Prozeßdruck, Ionenbeschleunigungsspannungen zwischen 1 und 50 Volt eingestellt werden. Die Ionenenergien sollten zwischen 1 und 40 eV, vorzugsweise zwischen 10 und 30 eV betragen. Bei zu hoch gewählten Ionenenergien verschlechtert sich die sogenannte Maskenselektivität und die Maske auf der Substratoberfläche 22 wird ebenfalls stark weggeätzt.

Die typischerweise erzielbaren Ätzraten in Silicium liegen zwischen 1 und 5 µm pro Minute, die Selektivität gegenüber Photoresistmasken beispielsweise zwischen 30 : 1 und 100 : 1. Durch das erfindungsgemäße Verfahren werden praktisch senkrechte Ätzprofile erreicht, wobei sich die Ätzgräben in die Tiefe tendenziell geringfügig verengen. Profile dieser Art sind für eine Wiederbeschichtung ideal. Da darüber hinaus auch Kanten- und Ätzgrundrauigkeiten sehr gering sind, können mit diesem Verfahren erzeugte Strukturen auch für Zwecke der Abformung, beispielsweise als Urform beim Spritzgießen, oder bei galvanischen Abformtechniken eingesetzt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum anisotropen Plasmaätzen von Substraten, insbesondere von Siliziumsubstraten, bei dem ein Abtragen der Substratoberfläche mittels zum Substrat hin beschleunigten Ionen erfolgt, **dadurch gekennzeichnet**, daß in den Prozeßraum (12) ein ein Halogen oder eine Halogenverbindung enthaltendes Ätzgas (40) und ein Passivierungsgas (40), das polymerbildende Monomere enthält, eingeleitet und durch Energieeinstrahlung (24) angeregt wird, und daß an das Substrat (20) oder an eine das Substrat (20) aufnehmende Elektrode (16) eine solche Spannung angelegt wird, daß die Ionen beim Auftreffen auf das Substrat (20) eine Energie zwischen 1 und 40 eV, vorzugsweise zwischen 10 und 30 eV, aufweisen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Ätzgas (40) SF₆, CF₄ oder NF₃ enthält.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Ätzgas (40) mit einer Strömungsgeschwindigkeit zwischen 10 und 200 sccm (standard ccm/min) eingeleitet wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Passivierungsgas (40) CHF₃, C₂F₄ oder C₂F₆ enthält.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet,

zeichnet, daß das Passiviergas (40) mit einer Strömungsgeschwindigkeit zwischen 50 und 300 sccm eingeleitet wird.

6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß in den Prozeßraum (12) Mikrowellenenergie eingestrahlt wird. 5

7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß in den Prozeßraum (12) Argon (40) mit einer Strömungsgeschwindigkeit zwischen 10 und 100 sccm eingeleitet wird. 10

8. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß in den Prozeßraum (12) N₂ (40) mit einer Strömungsgeschwindigkeit zwischen 10 und 100 sccm und/oder O₂ (40) mit einer Strömungsgeschwindigkeit zwischen 1 und 10 sccm eingeleitet wird. 15

9. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Substrat (20) auf Temperaturen unter 100°C gekühlt wird.

10. Vorrichtung zum Durchführen des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch einen einen Prozeßraum (12) schaffenden Rezipienten (10), der mindestens eine Elektrode, einen Gaseinlaß (36) und Mittel (24) zum Einstrahlen von Energie, insbesondere Mikrowellenenergie, aufweist. 25

11. Elektronisches Bauteil oder Sensorelement mit geätzten Strukturen, die ein hohes Aspektverhältnis bzw. schmale, tiefe Gräben aufweisen, gekennzeichnet durch die Herstellung nach dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9. 30

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

35

40

45

50

55

60

65

